6º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

6CFE01-521

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Sistemas de aprovechamiento para uso energético de productos de claras retrasadas mecanizadas sobre plantaciones de coníferas en terreno suave en Castilla y León (España)

TOLOSANA ESTEBAN, E.[1], LAINA RELAÑO, R.[1], MARTÍNEZ FERRARI, R. y MARTÍN SERRANO, M.[1]

[1] Departamento de economía y gestión forestal. E.T.S.I. Montes y Centro de Ingeniería Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28005 Madrid.

Resumen

Con el objetivo de estudiar, en el aprovechamiento de biomasa forestal proveniente de claras sobre plantaciones de coníferas, los factores determinantes de la productividad y los costes, y de comparar sistemas de trabajo alternativos, se estudiaron dos sistemas de aprovechamiento: Sistema 1, de árboles completos con apeo mecanizado, desembosque con autocargador y astillado en cargadero, en 3 estratos de claras de pino albar (*Pinus sylvestris* L.) en Cabrejas del Pinar y El Royo (Soria), y Sistema 2, de aprovechamiento de biomasa "residual" de ramas y copas, en una plantación de *Pinus* spp. en Brazuelo (León). En este último, se compararon las combinaciones de dos formas de apilar la biomasa – método B, con el propio cabezal cosechador en Borde de calle, y método C, dejando la biomasa en el Centro de la calle y apilándola posteriormente con *bulldozer*, con dos diámetros en punta delgada – 8 *vs.*10 cm -. El sistema 1, de árboles completos, arrojó costes competitivos de la astilla puesta en planta para diámetros normales mayores de 13 cm, supuesto un precio en pie de 7 €/t verde. Para el sistema 2, se analizaron los balances por hectárea en las condiciones actuales de mercado. La combinación del sistema C de depósito de biomasa en el Centro de la calle con posterior amontonado con *bulldozer* con el diámetro en p.d. de 10 cm fue la más rentable, siendo positivo en todas las alternativas ensayadas el balance de la recogida de biomasa, preferible al aprovechamiento único de madera delgada.

Palabras clave

Biomasa forestal, aprovechamiento, claras, plantaciones, mecanización, estudio de tiempos, análisis de costes.

1. Introducción

En España, las energías renovables contribuyeron al 11,6% del consumo de energía primaria en 2011, el objetivo en 2020 es el 20,1% (IDAE, 2010). El porcentaje de producción eléctrica alcanzó el 29,7%, con objetivo para 2020 del 36%. La biomasa y el biogás deberían crecer desde 2009 del 7 al 13% anual. El uso energético de residuos o productos forestales debería incrementarse sensiblemente para alcanzar esos objetivos.

La superficie forestada o reforestada en España, desde 1940 hasta 1984, fue de 3,38 Mha (GÓMEZ Y MATA, 1993). La superficie de plantaciones de coníferas durante la dictadura del general Franco (1940-1975), la transición democrática hasta la transferencia de las competencias a las CC.AA. (1976-1982) y el periodo de administración autonómica hasta la Política Agrícola Común (1983-1993) alcanzó 2,94 Mha, y en las forestaciones posteriores

de tierras agrícolas marginales – subvencionadas por la P.A.C. – de 1994 a 2008, se superaron las 650.000 ha de frondosas y resinosas (VALBUENA-CARABAÑA *et al*., 2010). En este periodo (MAGRAMA, 2012), las plantaciones adicionales sobre terrenos forestales, no financiadas por la U. E., alcanzaron 746.000 hectáreas de forestaciones y 173.000 de reforestaciones (en estos datos, faltan 2003 y 2004). Como resultado, si se suman las plantaciones de *Pinus pinaster* y *P. radiata* sobre terrenos privados, frecuentes en el noroeste, casi cinco millones de hectáreas forestales estarían cubiertas por plantaciones de coníferas. Aunque una proporción considerable de la superficie pública plantada se corresponda con masas protectoras en que la gestión es baja, hay un enorme potencial de producción de biomasa en cortas de mejora o claras. Estos tratamientos, frecuentemente retrasados con respecto a las prescripciones selvícolas, producen buena parte de la madera delgada consumida sobre todo por la industria de trituración, pero la potencialidad es mucho mayor que las cortas. La demanda creciente de biomasa forestal para uso energético puede ser una oportunidad para la gestión de estas plantaciones.

El sistema mecanizado de árboles completos (denominado Sistema 1 a lo largo de esta comunicación) es frecuente para aprovechar la biomasa de árboles pequeños de claras o clareos, usando taladoras-apiladoras con cabezales acumuladores seguidas de autocargadores forestales, tanto en los Países Nórdicos (ALLA-FOSSI, 2005; KALLIO & LEINONEN, 2005; KÄRHÄ, 2007) como en Norteamérica (ADEBAYO *et al*., 2007). En los países mediterráneos europeos, hay experiencias en claras de plantaciones de coníferas y otras masas (LAINA *et al*., 2008; SPINELLI & NATI, 2009; CANGA *et al*., 2009a: CANGA *et al*., 2009b; TOLOSANA, 2009).Como conclusión de los estudios, el sistema puede ser competitivo, pero su rentabilidad está muy condicionada por el tamaño de los pies, de modo que el uso energético compite con el uso de madera delgada para otros destinos.

Otro sistema de aprovechamiento para energía es la recolección de biomasa "residual" – ramas y copas– de estos tratamientos después del aprovechamiento de madera, que se denominará en esta comunicación Sistema 2. En general, la rentabilidad de esa recogida (SPINELLI, 2007; TOLOSANA, 2009) depende de:

1) la integración entre el aprovechamiento de madera y "residuos" – las ramas y copas deben acumularse lo más limpios posible de tierra y piedras, lo que se facilita mucho si la corta y procesado son mecanizados –,
2) la carga de biomasa a recoger por hectárea – cuanto mayor, mayor rentabilidad –, y
3) el tamaño de las ramas y copas – cuanto mayor tamaño, mayor rentabilidad -.

En las primeras claras, incluso muy retrasadas, los últimos factores perjudican la rentabilidad de la recogida de ramas y copas en este Sistema 2. No obstante, aprovechar por separado madera y biomasa puede tener interés para evitar la competencia entre la madera delgada sólida y el uso energético, importante problema de mercado en algunas zonas de España para la industria de tableros de desintegración. Es una de las causas de que la legislación de fomento de la biomasa forestal para generación eléctrica (R.D. 661/2007) perjudique a los residuos frente a otros materiales leñosos y se ocupe de su trazabilidad. Dos de los factores que afectan más la productividad y el coste de esta recogida de ramas y copas para su saca con autocargador son:

1) la **forma de amontonar o acordonar la biomasa:** apilarlas con el cabezal cosechador al Borde de las calles (Método B), o dejar las ramas y copas en el Centro de las calles, lo habitual en el aprovechamiento de madera tronzada, y opcionalmente emplear un tractor auxiliar para amontonarlas después de sacar la madera (Método C), y

2) el **diámetro en punta delgada**, que condiciona el tamaño y la cantidad por unidad de superficie de las ramas y copas que se emplean como biomasa.

2. Objetivos

Son objetivos del presente trabajo los siguientes:

- Analizar dos de los principales sistemas de aprovechamiento de biomasa en claras sobre repoblaciones de coníferas, a partir de estudios de tiempos en casos reales, en condiciones favorables pero representativas de claras mecanizadas en España.
- Para el primer sistema (Sistema 1 o de árboles completos en claras mecanizadas), estudiar la dependencia de la productividad y coste de sus factores explicativos, valorando, en las condiciones de mercado actuales, sus límites de rentabilidad.
- Para el Sistema 2, de aprovechamiento de ramas y copas en claras mecanizadas, comparar dos métodos de amontonado de la biomasa y dos diámetros en punta delgada para valorar su efecto en la productividad, coste y rentabilidad de recogida en las condiciones actuales de mercado.

3. Metodología

3.1. Caracterización dasonómica y dasométrica.

Para el Sistema 1, se seleccionaron dos claras mecanizadas en terrenos casi llanos de Cabrejas del Pinar y El Royo (Soria), en plantaciones de *Pinus sylvestris* L. Se diferenciaron tres estratos con distintas condiciones de clara: El Royo 1, con menor diámetro medio y menor cantidad de biomasa extraída; El Royo 2, con mayor diámetro y más carga de biomasa, y Cabrejas, de condiciones intermedias. Para el Sistema 2, se seleccionó una primera clara retrasada sobre una repoblación mixta de *Pinus sylvestris*, *P. nigra* y *P. pinaster*, llana o con pendiente moderada (10-15%) en Brazuelo (León). Eran montes públicos con claras muy retrasadas, fuertes y de carácter mixto.

En cada estrato se llevó a cabo un inventario con parcelas permanentes. En los tres del Sistema 1, sobre 4 parcelas de 25x25 m^2 por estrato. En cada estrato se tomó una muestra de 2 árboles por clase diamétrica de 5 cm y se pesaron las fracciones de biomasa según el criterio de MONTERO *et al*. (2005), con el objeto de valorar la proporción de biomasa de ramas y copas sobre el total. En el sitio de ensayo del Sistema 2, se inventariaron 18 parcelas circulares de 10 m de radio.

Las claras en los estratos del Sistema 1 se caracterizan en la Tabla 1. En el sitio de ensayo del Sistema 2, el diámetro normal medio inicial era de 19.8 cm, y se pasó de 1251 pies/ha a 781, extrayéndose un 24% del área basimétrica.

Tabla 1: Condiciones de las claras en los estratos en que se estudio el Sistema 1

Estrato	Cabrejas	El Royo 1	El Royo 2
Densidad inicial (pies/ha)	1856	2537	1725
Densidad final (pies/ha)	832	869	767
Diámetro normal medio inicial, cm	16,0	9,9	18,9
Biomasa aérea inicial (t/ha, peso verde)	208,0	151,2	327,6
Biomasa aérea extraída (t/ha, peso verde)	94,8	74,0	161,8
Proporción media (%) de peso de biomasa ramas y copa/biomasa aérea total	40	46	37

3.2 . Maquinaria.

Para el Sistema 1, se efectuó el apeo y apilado con una cosechadora Valmet 911.1 con cabezal convencional (no acumulador), y para el desembosque de los árboles completos se usó un autocargador Valmet 910. En los dos estratos de El Royo se usó, en cargadero, una astilladora Woodsman remolcada por tractor, con motor propio de 257 kW, que requería un pequeño camión con grúa para su alimentación. En el estrato de Cabrejas, se procesaron los árboles completos con una trituradora mixta (de martillos con filo de acero endurecido) Willibald ESU 4800 de 353 kW sobre remolque de camión, sin grúa (precisaba también un camión con grúa para alimentarse).

En el Sistema 2, el apeo y procesado lo llevó a cabo una cosechadora convencional John Deere 1270D, y se usaron un autocargador Dingo 6x6 de 89 kW para el desembosque de la madera y un autocargador Timberjack 1410D de129 kW para el de la biomasa de ramas y copas. En el método C, en que se usaba un tractor auxiliar para acordonar, era un *bulldozer* Fiat-Hitachi FD 175 de 140 kW con un apero frontal tipo peine, y en todas las variantes la biomasa se trituró con una pretrituradora de tornillos lentos Hammel WB 950 de 522 kW.

3.3 . Estudio de tiempo y productividad.

Para el estudio de tiempos, las operaciones se dividieron en fases para estudiar la distribución del trabajo, los tiempos muertos y esperas, etc. Para la clasificación de los tiempos y los elementos de trabajo, se emplearon los estándares de IUFRO (BJORHEDEN & THOMPSON, 2000), con los formularios desarrollados en la Acción Concertada europea AIR3-CT94-2097 (DE MENTHIERE, 1995). Los sistemas de estudio de tiempos fueron distintos según la tarea: para las cíclicas, como el apeo y apilado de árboles completos o el desembosque de madera y biomasa, se adoptó el cronometraje continuo o estudio detallado con separación de elementos del ciclo (MAGAGNOTTI & SPINELLI, Eds., 2012), usando una libreta de campo electrónica Psion Workabout® con el *software* especifico Kronos 3.0® (AMBROSIO y TOLOSANA, 2007). En caso de operaciones no cíclicas – apilado de biomasa, astillado o trituración – y para el apeo y elaboración en el Sistema 2, se usó el estudio de frecuencias (muestreo de trabajo): el cronometrador registraba, con un reloj que pitaba cada minuto, el elemento del ciclo de trabajo que se estaba ejecutando en ese momento.

El control de la productividad se llevó a cabo de distinta forma según la operación. En el Sistema 1, los árboles completos se contaban, se estimaba su clase diamétrica y se aplicaban los valores medios de peso de biomasa aérea. En el Sistema 2, las trozas se contaban y se medía una muestra de al menos 30 por método alternativo de aprovechamiento, en pilas seleccionadas al azar. Las cargas de autocargador se contaban y el volumen aparente de madera o de biomasa se evaluaba *a posteriori*, aprovechando paradas de la máquina

cargada. La densidad aparente y la humedad de la biomasa bruta, astillada o triturada, se midió en varias muestras por estrato, pesando el contenido de recipientes de volumen aparente conocido, que luego se pesó en laboratorio, tras secado en estufa para determinar su humedad.

3.4. Ajuste de modelos predictivos y comparación de métodos de trabajo.

Cuando se hizo un cronometraje detallado con base cíclica, o un estudio de frecuencias sobre intervalos, se tomaron datos de los parámetros más influyentes sobre la productividad (diámetro medio, distancia de desembosque, distancia de carga, pendiente media,…) para ajustar curvas de regresión que proporcionaron la productividad en función de dichos parámetros.

De cada ciclo, en los estudios por cronometraje continuo, se obtuvo un par o conjunto de valores (tiempo o productividad – valor/es de parámetro/s explicativo/s) para el ajuste de ecuaciones por procedimientos de regresión lineal múltiple, mediante el programa estadístico Statgraphics Plus 5.1. En los cronometrajes por muestreo, los intervalos de una hora de trabajo efectivo – con sus correspondientes valores medios de la producción y de los factores explicativos - se consideraron como pares o conjuntos de datos para los estudios de regresión, o como replicaciones de cada tratamiento en los estudios comparativos. Ello obligaba a medir la producción también por separado en cada intervalo.

Las curvas de regresión en que la variable dependiente era la productividad (definida como producción – m^3 ó t verdes - por hora de trabajo efectivo E_0), se simplificaron a través de la relación auxiliar de la expresión (1), que relaciona la distancia de carga en un ciclo de desembosque D_c (m/ciclo) con la capacidad de carga C (m^3/ciclo ó t/ciclo), el peso de la corta P (m^3/ha ó t/ha) y la distancia entre calles S (m), según:

$$D_c = 10^4 \cdot C/(P \cdot S) \quad (1)$$

En los estudios comparativos (Sistema 2), se aplicó un análisis de varianza ADEVA para la comparación de las cuatro combinaciones de los dos factores considerados (método de apilado de la biomasa y diámetro en punta delgada), empleando también el programa estadístico Statgraphics Plus 5.1.

Las ecuaciones simplificadas de productividad se transformaron en ecuaciones predictivas de costes unitarios a través de la expresión (2), que relaciona coste unitario directo C_U (€/t ó €/m^3) con productividad *Prod* (m^3/h ó t/h) a través del coste horario C_h (€/h) del medio de producción utilizado en cada operación, estimado por métodos clásicos (MIYATA, 1981), a partir de los precios y consumos obtenidos *in situ* y contrastados con referencias bibliográficas o empresariales fiables.

$$C_U = C_h / Prod \quad (2)$$

En todos los casos, la unidad de tiempo considerada, h, fue la hora de trabajo efectivo E_0, de acuerdo con los criterios de IUFRO (BJORHEDEN & THOMPSON, 2000), recogidos también en MAGAGNOTTI & SPINELLI, Eds. (2012). Los costes unitarios se evaluaron dependiendo del producto considerado, como sobre m^3 de madera con corteza o t verde de biomasa (al 45% medio de humedad observada sobre peso total).

3.5. Estimación de ingresos y costes y comparación de tratamientos.

A los costes unitarios medios estimados en los aprovechamientos, se sumaron los costes medios de transporte de biomasa procesada y de madera, dependiendo del Sistema y de las distancias de transporte observadas.

En el Sistema 1, como precio conjunto de madera y biomasa en pie, , al no existir un mercado unificado, se adoptó un valor de referencia próximo a los valores de mercado para la madera delgada en el momento de los ensayos, de 7 €/t verde.

En el Sistema 2, los métodos de trabajo no se podían comparar en términos de productividad o coste unitario directo, puesto que cada combinación, en función del método de trabajo y del diámetro en punta delgada, daba lugar a distintas producciones de madera y biomasa a diferentes costes unitarios. Además, ambos productos (madera y biomasa triturada para uso energético) tienen diferentes precios de mercado que dan lugar a distintos ingresos dependiendo de la producción, así que se decidió que la metodología para comparar las combinaciones de los métodos de trabajo – formas de apilado x diámetro en punta delgada – fuese la comparación de la diferencia entre ingresos y costes por hectárea.

En todos los casos, sobre los costes de aprovechamiento y transporte, para valorar los costes unitarios del suministro, se añadieron un 15% de costes fijos e indirectos y un 12.5 % de beneficios del empresario subcontratado para su ejecución.

4. Resultados

4.1. De los estudios de tiempo y productividad.

Los tiempos de cronometraje y la productividad media sobre tiempo de trabajo de las operaciones en los estratos del Sistema 1, de árboles completos, se presentan en la Tabla 2. Los tiempos de cronometraje y productividades medios de los métodos de trabajo comparados en el Sistema 2, de aprovechamiento integrado de madera y biomasa “residual”, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2: Métodos de control, tiempo de cronometraje (horas de presencia) y productividad media (toneladas verdes por hora de trabajo efectivo) por estrato de las operaciones en el Sistema 1 (de árboles completos)

Operación	Método de control	Tiempo de control, $h_{presencia}$			Productividad, t/h_{tr}		
		Cabrejas	El Royo 1	El Royo 2	Cabrejas	El Royo 1	El Royo 2
Apeo y apilado (cosechadora)	Estudio de tiempos detallado por ciclos	36.4	32.0	11.0	9.5	8.2	9.4
Desembosque árboles completos (autocargador)		20.4	46.0		4.8	7.5	
Astillado	Estudio de frecuencias (muestreo de tiempo)	------	15.0		-----	14.2	
Triturado		2.6	-----		31.6	------	

4.2. Modelos predictivos de la productividad y comparación entre tratamientos.

4.2.1. Para el Sistema 1 (de árboles completos).

A partir del cronometraje, se han ajustado las ecuaciones que muestra la Figura 1. Según la curva de la izquierda, aumenta la productividad del apeo y apilado mecanizados según crece el diámetro mientras el tronzado no es necesario – porque el árbol completo cabe en el autocargador -; la curva de la derecha representa la productividad a partir del tamaño de árbol que ya requiere tronzado y reapilado para su carga en el autocargador.

La Figura 2 muestra el efecto de la distancia de saca en la productividad para los autocargadores estudiados.

Tabla 3: Productividad ($m^3/h_{trabajo}$ de madera y t verdes de biomasa/$h_{trabajo}$) de las operaciones de aprovechamiento de madera y biomasa para las alternativas estudiadas del Sistema 2 (aprovechamiento integrado de madera y residuos)

				Alternativa (Método de apilado de biomasa-Borde/Centro de calle - x Diámetro en punta delgada)			
				BØ10	BØ8	CØ10	CØ8
Producto	Operación	Método de control	T. control, $h_{presencia}$	Productividad, m^3/h_{tr}			
Madera en rollo	Apeo y procesado	Estudio de frecuencias (muestreo de tiempo)	94	3.9	5.4	7.6	9.8
	Desembosque autocargador	Estudio de tiempos detallado por ciclos	30	17.6			
Producto	Operación	Método de control	T. control, $h_{presencia}$	Productividad, t/h_{tr}			
Biomasa triturada	Amontonado con *bulldozer*	Estudio de frecuencias (muestreo de tiempo)	33	-----		28.6	
	Desembosque autocargador	Estudio de tiempos detallado por ciclos	17	4.7		6.2	
	Pretrituración	Estudio de frecuencias (Muestreo de tiempo)	18	36.5			

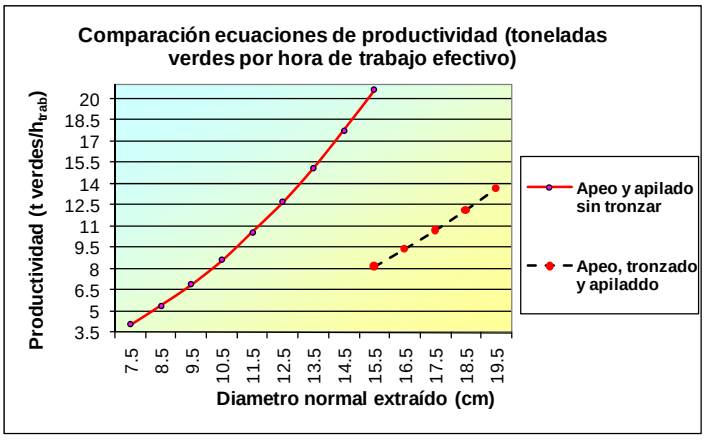

Figura 1: Productividad en t verdes por hora de trabajo en al apeo y apilado de árboles completos con cosechadora (Sistema 1) frente al diámetro normal medio de los pies extraídos, cm.

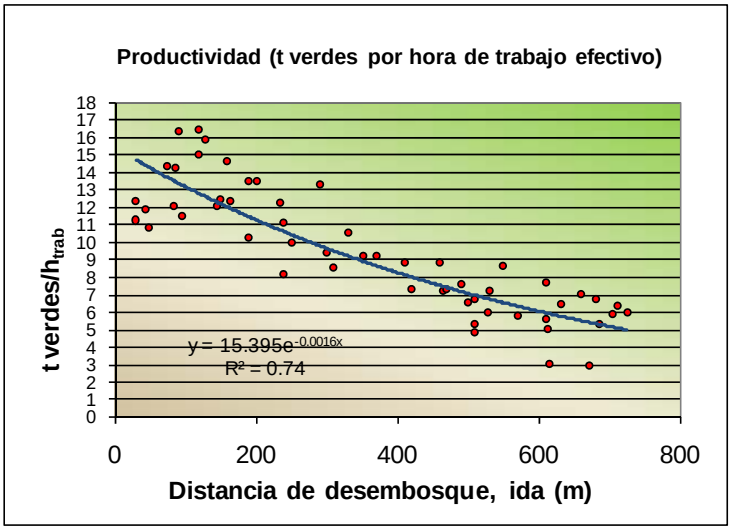

Figura 2: Productividad en t verdes por hora de trabajo en el Sistema 1, del desembosque de árboles completos con autocargador (Cabrejas, El Royo 1 y El Royo 2) frente a la distancia de desembosque (ida), m.

4.2.2. Para el Sistema 2 (aprovechamiento integrado de madera y residuos).

El resultado de comparar las 4 alternativas combinando método de apilado de ramas y puntas (con el cabezal de la cosechadora en el Borde de las calles - método B - o depositándolas en el Centro de las calles para luego amontonarlas con *bulldozer* - método C -) y los diámetros en punta delgada para separar madera de biomasa (8 ó 10 cm) se muestra en la Figura 3. La productividad en madera es significativamente distinta al 95% de confianza entre todos los casos, máxima en el método de trabajo CØ8 y mínima en el BØ10.

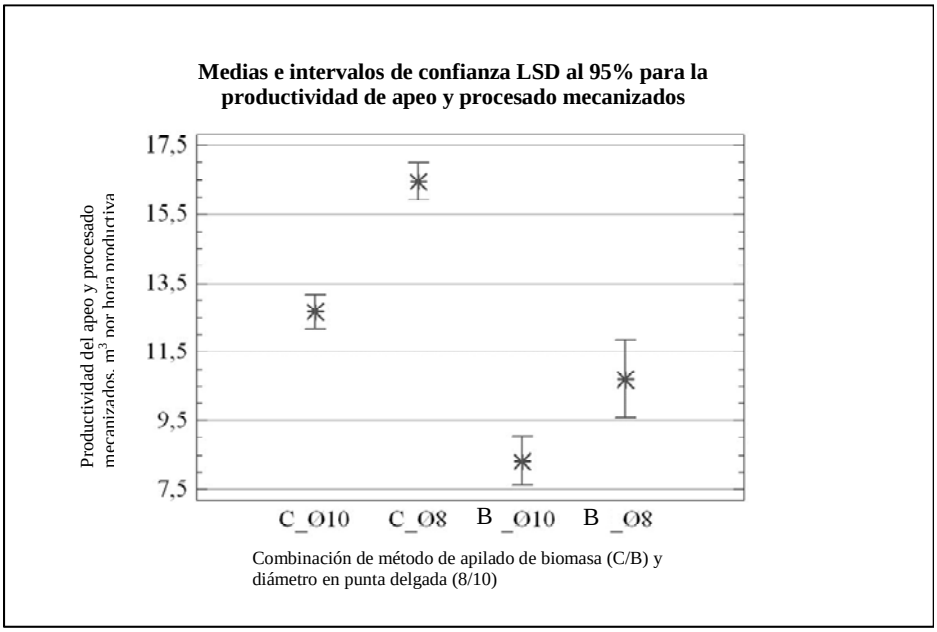
Medias e intervalos de confianza LSD al 95% para la productividad de apeo y procesado mecanizados
Productividad del apeo y procesado mecanizados, m³ por hora productiva
17,5
15,5
13,5
11,5
9,5
7,5
C_Ø10
C_Ø8
B _Ø10
B _Ø8
Combinación de método de apilado de biomasa (C/B) y diámetro en punta delgada (8/10)

Figura 3: ADEVA para la comparación de la productividad en el apeo y procesado mecanizados para los métodos de trabajo comparados en el Sistema 2, de aprovechamiento integrado de madera y biomasa (ramas y copas).

Para el desembosque de madera se ajustaron ecuaciones de productividad en función de la distancia de desembosque y la distancia de carga por ciclo, que se simplificaron en función de distancia de desembosque *DistDesemb* (ida, m), capacidad de carga *C* (m^3/ciclo), distancia entre calles

(*S*, m) y peso en madera de la clara (*P*, m^3/ha). Las curvas para terreno llano y ligeramente pendiente (10-15%) resultaron significativamente distintas - ecuaciones (3) y (4) -, y a las curvas de regresión previas a la mencionada simplificación correspondieron valores del coeficiente de determinación, R^2, ajustado en función de los grados de libertad, del 79,0 y 93,9%, respectivamente.

$$Prod\ (m^3/h_{trab}) = [3{,}600 \cdot C(m^3)] / \{1{,}944.5 + 1.52 \cdot C(m^3) / [P(m^3 \cdot ha^{-1}) \cdot S(m) \cdot 10^{-4}] + 2.78 \cdot DistDesemb\} \quad (3)$$

$$Prod\ (m^3/h_{trab}) = [3{,}600 \cdot C(m^3)] / \{1{,}788.9 + 1.97 \cdot C(m^3) / [P(m^3 \cdot ha^{-1}) \cdot S(m) \cdot 10^{-4}] + 3.74 \cdot DistDesemb\} \quad (4)$$

Para el desembosque de biomasa también se desarrollaron, a partir de curvas de regresión, ecuaciones de productividad en función de la distancia de desembosque, la capacidad de carga (mayor en el caso de apilar la biomasa con *bulldozer*, por una mayor densidad de amontonado), la distancia entre calles y el peso en biomasa de la clara (estos últimos factores condicionan la cantidad de biomasa por 100 m de calle, y por tanto la distancia de carga). Las curvas se muestran en la Figura 4. En el rango de distancias estudiado, la productividad fue mayor en el método C de apilado con *bulldozer*.

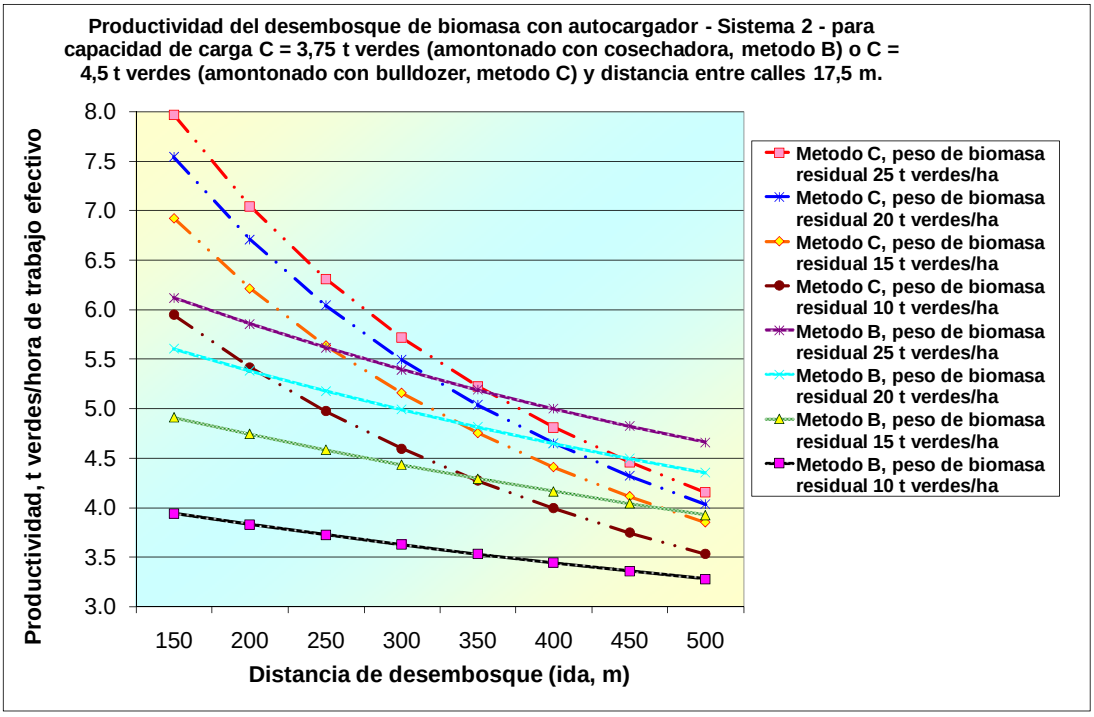
Productividad del desembosque de biomasa con autocargador - Sistema 2 - para capacidad de carga C = 3,75 t verdes (amontonado con cosechadora, metodo B) o C = 4,5 t verdes (amontonado con bulldozer, metodo C) y distancia entre calles 17,5 m.
Productividad, t verdes/hora de trabajo efectivo
8.0
7.5
7.0
6.5
6.0
5.5
5.0
4.5
4.0
3.5
3.0
150
200
250
300
350
400
450
500
Distancia de desembosque (ida, m)
Metodo C, peso de biomasa residual 25 t verdes/ha
Metodo C, peso de biomasa residual 20 t verdes/ha
Metodo C, peso de biomasa residual 15 t verdes/ha
Metodo C, peso de biomasa residual 10 t verdes/ha
Metodo B, peso de biomasa residual 25 t verdes/ha
Metodo B, peso de biomasa residual 20 t verdes/ha
Metodo B, peso de biomasa residual 15 t verdes/ha
Metodo B, peso de biomasa residual 10 t verdes/ha

Figura 4: Productividad (t verdes / $h_{trabajo}$) del desembosque de biomasa de ramas y puntas con autocargador en el Sistema 2, en función del método de apilado, la distancia de saca y el peso de biomasa por hectárea.

4.3. Estimación de costes horarios y unitarios

Los costes horarios estimados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Costes horarios estimados de la maquinaria

Máquina	Coste horario (Sistema 1, de árbol completo), €/$h_{trabajo}$	Coste horario (Sistema 2, integrado), €/$h_{trabajo}$
Cosechadora forestal	78.0	66.2
Autocargador (madera)		45.2
Autocargador (árboles completos)	48.0	
Autocargador (ramas y copas)		52.9
Bulldozer		38.0
Astilladora	120.0	
Trituradora	135.2	
Pretrituradora		122.0
Pala cargadora *Manitou* (carga de astillas o material triturado en camión)	17.1	17.1

Para el Sistema 1, los costes unitarios directos del aprovechamiento se representan en la Figura 5, para una distancia de desembosque media de 200 m, frente al diámetro normal medio extraído, para tres tamaños de aprovechamiento que corresponden a una producción total de biomasa de 500, 1000 y 1500 t verdes, respectivamente, incluyendo costes de transporte de astilla a una distancia de 35 a 55 km (7 €/t), costes indirectos y de estructura y beneficios, pero no un precio de la biomasa en pie. Si se asume un precio de 7 €/t verde, el coste de la astilla para diámetros de 11 cm superaría 45 €/t verde, que para una humedad del 45%, se considera superior a los precios de mercado, mientras que para diámetros normales medios de 13 cm o superiores, se encontrarían por debajo de este precio (incluso en torno a 40 €/t o menos en aprovechamientos de cierto tamaño o con mayores diámetros, lo que sí se considera competitivo). Si los precios en pie fueran mayores o menores, la rentabilidad se alcanzaría para diámetros mayores o menores, respectivamente.

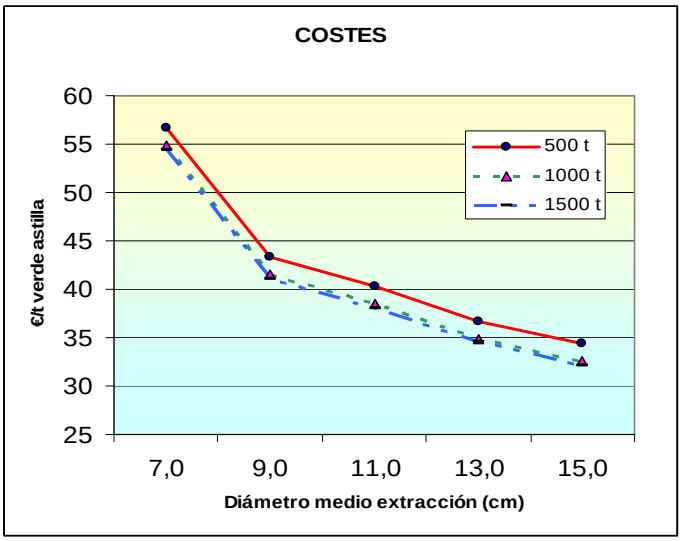

Figura 5: Costes de suministro para la biomasa (€/t de astilla al 45% de humedad) en el Sistema 1 (árboles completos procedentes de claras), sin incluir precios en pie, en función del diámetro normal medio extraído.

En el Sistema 2, para comparar económicamente las alternativas sobre una base común, la extracción de madera en rollo y biomasa en cada caso debe tenerse en cuenta, para estimar los costes e ingresos por hectárea. En el balance de la Tabla 5 no se considera el precio en pie (que se puede valorar como margen a partir de los precios finales), pero sí el 15% de costes indirectos y de estructura y el 12,5% de beneficios, así como los costes de transporte, de 12.7 y 9.0 €/t, respectivamente para la biomasa triturada y la madera, para 60 km de distancia al centro de consumo.

Los precios en fábrica de la madera se evaluaron según destino: para tablero de partículas, se estimó en 30 €/t, y para postes y madera de envase, en 50 €/t. El destino de la madera, para un diámetro límite de 10 cm, era en un 40% para trituración y el resto para sierra de pequeña dimensión. La madera adicional cuando el diámetro en p.d. se reduce a 8 cm se supuso destinada a trituración en su totalidad. El precio adoptado para la biomasa triturada puesta en planta fue de 42 €/t verde.

Es notable que, a pesar de los elevados costes asociados al Sistema 2 de recolección de biomasa residual en claras, el balance sea positivo en todos los casos, superior para la extracción de madera y biomasa que sólo para madera, por lo que hay margen suficiente para pagar un precio en pie. Si se compara el balance global, la opción más rentable es la CØ10 (dejar la biomasa en el Centro de las calles, con diámetro en punta delgada mayor – 10 cm – y amontonarla después con un *bulldozer*). El balance dividido por la producción deja un margen para madera y biomasa en pie de más de 15 €/t verde, supuesta una densidad de 0,85 t/m^3.

Tabla 5: Balance de costes e ingresos por hectárea en las alternativas comparadas del sistema 2, de aprovechamiento integrado de biomasa y madera

		Sistema de aprovechamiento (Método de apilado de biomasa x Diámetro en punta delgada)			
		BØ10	**BØ8**	**CØ10**	**CØ8**
Extracciones	**Madera(m^3/ha)**	33.21	42.16	33.21	42.16
	Biomasa(t/ha)	32.60	18.60	32.60	18.60
Coste unitario	**Madera(€/m^3)**	34.00	28.02	23.50	21.03
	Biomasa(€/t)	31.50	31.50	29.70	29.70
Costes (C, €/ha)	**Madera**	1,129.10	1,181.31	780.40	886.62
	Biomasa	1,026.90	585.90	968.20	552.42
	Madera +Biomasa	2,156.00	1,767.41	1,748.70	1,439.04
Ingresos (I, €/ha)	**Madera**	1,394.82	1,666.58	1,394.82	1,666.58
	Biomasa	1,369.20	781.20	1,369.20	781.20
	Madera +Biomasa	2,703,84	2,447.68	2,764.02	2,447.68
Balance: Ingresos – Costes (I – C, €/ha)		**547.84**	**576.91**	**1,015.32**	**905.28**

4. Discusión

La biomasa para uso energético en claras de plantaciones jóvenes se considera poco rentable, siendo los sistemas más adecuados el de árbol completo o el convencional de madera tronzada (SUADICANI, 2003; BERGSTRÖM *et al*., 2007; SPINELLI, 2007; TOLOSANA, 2009; SPINELLI & MAGAGNOTTI, 2010). En los países nórdicos, el sistema más utilizado para árboles pequeños o de tamaño medio, es el de árboles completos, con variantes en el apilado (KÄRHÄ, 2011). Los casos estudiados del Sistema 1, claras mecanizadas con cosechadoras convencionales en terrenos llanos con tamaño de pies de 9,9 a 18,9 cm de diámetro antes de la clara, arrojan costes competitivos - para un precio de madera y biomasa en pie de 7 €/t al 45% de humedad y una distancia de transporte de 35 a 55 km - para un diámetro normal medio extraído superior a 13 cm. Los factores condicionantes de la productividad identificados (diámetro normal, distancia de desembosque) son generalmente reconocidos, si bien destaca la caída en la productividad de apeo y apilado a partir de 16 cm de diámetro, por necesitarse tronzar y reapilar los pies para su saca.

En el mismo caso estudiado (Sistema 1), la productividad de la trituradora del estrato de Cabrejas, más potente, es bastante mayor que la de la astilladora de los dos estratos de El Royo (Tabla 2), siendo el producto de calidad inferior pero casi equiparable. No obstante, puede haber sobreestimación en el primer caso, al ser más corto el periodo de control, por no recogerse adecuadamente los tiempos de mantenimiento, interrupción o incidencias. Dentro del mismo Sistema, la mayor productividad de la cosechadora en apeo y apilado en Cabrejas con respecto a El Royo 2, a pesar de ser en este último estrato los árboles de mayor tamaño, se debe a que en una mayor proporción tenía que tronzarlos para que cupieran en el autocargador.

El Sistema 2 (recolección de ramas y copas en una clara mecanizada retrasada) se estudió en una repoblación sobre terreno casi llano, con diámetro antes de la clara de 19.8 cm. La escasa producción por ha de biomasa residual en claras podría ser una restricción económica decisiva para este tipo de aprovechamiento (KALLIO & LEINONEN, 2005; SPINELLI, 2007). Ciertos cambios en los sistemas de trabajo podrían mejorar la rentabilidad, como la acumulación de la biomasa en montones o cordones, fundamental para optimizar su carga y mejorar la eficiencia de la recogida (SUADICANI, 2003; TOLOSANA *et al*., 2011). El manejo apropiado de los residuos empleando el cabezal cosechador es esencial para mejorar la productividad en cortas de regeneración (NURMI, 2007), si bien el tiempo de apeo y procesado de la madera se incrementa en un 20% como media (TOLOSANA, 2009).

En cuanto al desembosque de biomasa en ambos Sistemas, los factores condicionantes que se han identificado – capacidad de carga, distancia de desembosque, peso de madera o biomasa por hectárea – son generalmente admitidos (KALLIO & LEINONEN, 2005; SPINELLI, 2007; NURMI, 2007; entre otros). En el Sistema 2, destaca como factor favorable para el desembosque la mayor densidad de apilado cuando se usa el *bulldozer* para el amontonado en vez de el cabezal cosechador, si bien para una evaluación completa de esa ventaja debería haberse analizado la influencia del método de apilado en la presencia de impurezas, que podría condicionar el precio de la biomasa.

5. Conclusiones

El balance económico de la recolección de biomasa en claras mecanizadas retrasadas sobre terreno llano puede ser económicamente rentable empleando los sistemas de aprovechamiento estudiados.

En el Sistema 1, mecanizado de árboles completos con astillado integral en cargadero, el principal factor de costes es el tamaño de los árboles. Para un precio de la biomasa aérea en pie de 7 €/t verde (al 45% sobre peso húmedo), una distancia de transporte reducida (inferior a 55 km) y una distancia de desembosque media (200 m), la astilla resulta competitiva a los precios de mercado actuales para diámetros normales extraídos de 13 cm o mayores.

En el Sistema 2, de recogida de ramas y copas después de la extracción de la madera de la clara mecanizada con triturado en cargadero, adoptar un diámetro en punta delgada mayor y apilar la biomasa usando un *bulldozer* con un apero frontal tipo peine es preferible, desde el punto de vista económico, a un diámetro en punta delgada inferior y al apilado en borde de calle usando el cabezal cosechador, en las condiciones de mercado actuales. El balance económico de la extracción de biomasa en el caso estudiado, resulta positivo para todas las alternativas comparadas, y siempre preferible a la extracción de madera delgada sin sacar la biomasa "residual", dejando un margen para la retribución de la biomasa en pie.

Posteriores estudios deberían analizar los posibles efectos negativos de retirar las ramas y puntas en estas intervenciones, sobre todo usando un *bulldozer* para su apilado. También debería estudiarse en futuros trabajos la influencia del método de amontonado de la biomasa en su calidad e, indirectamente, en su precio (por el probable mayor contenido de arena y otras impurezas si se apila con *bulldozer*), para afinar la evaluación económica.

6. Agradecimientos

Agradecemos a Cesefor (Fundación Centro para la Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León), que financió y coordinó las experiencias de campo. La Administración Forestal de la C.A. de Castilla y León también apoyó estos trabajos. Debemos agradecer su activa colaboración a las empresas Triturados Montero y Maderas Rubial, y agradecer su cooperación y desear lo mejor en su vida profesional a los jóvenes ingenieros forestales que participaron en el trabajo de campo: Sergio Flores, Édgar Sánchez-Redondo, David Donaire, Luisa Valdés, Ana Navas, Carlos Vaca, Carolina Poncela e Irene Zaragoza.

7. Bibliografía

ADEBAYO, A.; HAN, H.; JOHNSON, L. 2007. Productivity and cost of cut-to-length and whole-tree harvesting in a mixed-conifer stand. *For Prod J* 57: 59-69.

ALA-FOSSI, A. 2005. Forest Fuel Production in Finland. Contribution from FFRI. 5Eures Project Meeting, Joensuu (Finland), METLA, 2005. Disponible en: http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/5eures/biomass_production_transport/supply_chains_and%20_technologies/material/Forest_fuel_supply_chains_and_technologies_AnttiAla-Fossi.pdf (último acceso: 01/2013).

AMBROSIO, Y.; TOLOSANA, E. 2007. El control de tiempos y rendimientos en los trabajos forestales. El programa Kronos. *Montes* 87:14-20.

BERGSTRÖM, D.; BERGSTEN, U.; NORDFJELL, T.; LUNDMARK, T. 2007. Simulation of geometric thinning systems and their time requirements for young forests. *Silva Fennica* 41(1):137–147.

BJORHEDEN, R,; THOMPSON, M. A., 2000. An international nomenclature for forest work study, En: FIELD, D. B. (Ed.) Proceedings of IUFRO 1995 S3.04 Subject Area: 20th World Congress; Tampere, Finland. University of Maine: 190-215. Orono, Maine (USA).

CANGA, E.; SÁNCHEZ, S.; MAJADA, J. 2009a. Rendimientos y costes en un aprovechamiento de biomasa en un pinar de Asturias (N de España). Presentación oral en el II Congreso de Agroingeniería, Lugo.

CANGA, E.; PRADA, M.; MAJADA, J. 2009b. Modelización de la biomasa arbórea y evaluación de rendimientos y costes en una clara de *Pinus pinaster* para la obtención de biomasa en Asturias. Presentación oral en el 5° Congreso Forestal Español, Ávila.

DE MENTHIERE, N. 1995. Harmonization of Ongoing European Research in the Field of Harvesting Operations. Proceedings of IUFRO XX World Congress. Tampere (Finlandia).

GÓMEZ, J.; MATA, R. 1993. Actuaciones forestales públicas desde 1940. Objetivos, criterios y resultados. En: GIL, A.; MORALES, A., eds., 1993. Medio siglo de cambios agrarios en España. Instituto de Estudios Juan Gil-Albert, pág. 151-190.

IDAE, 2010. Plan de Energías Renovables 2011 – 2020. Disponible en: http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_PER_2011-2020_def_93c624ab.pdf (último acceso 01/2013)

KALLIO, M.; LEINONEN, A. 2005. Production Technology of Forest Chips in Finland. Project Report PRO2/P2032/05. Ed. VTT Processes. Helsinki (Finlandia).
KÄRHÄ, K. 2007. Machinery for forest chip production in Finland in 2007. Metsateho OY Research Results. Helsinki (Finlandia).

KÄRHÄ, K. 2011. Integrated harvesting of energy wood and pulpwood in first thinnings using the two-pile cutting method. *Biomass Bioenergy* 35(8): 3397-403.

LAINA, R.; TOLOSANA, E.; MARTÍNEZ-FERRARI, R. 2008. Whole Tree Chipping Systems in Coppice Natural Stands and Young Pine Plantations in Castilla y Leon (Central Spain). Presentación oral. Congreso: World Bioenergy. Estocolmo (Suecia).

MAGAGNOTI & SPINELLI, 2012 (Eds.). Good practice guidelines for biomass production studies. CNR-IVALSA. 52 pag. Disponible en: http://www.forestenergy.org/observer:get_page/observer/action/details/itemid/113&viewportheight=665&viewportwidth=1133 (último acceso: 01/2013)

MAGRAMA, 2012. Anuario de Estadística Forestal 2009. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/montes-y-politica-forestal/AEF_2009_DOCUMENTO_COMPLETO_tcm7-215486.pdf (último acceso: 01/2013)

MIYATA, E. S. 1981. Logging system cost analysis. Comparison of methods used operating costs of logging equipment, U.S.D.A. Forest Service, General Technical Report NC-55. St. Paul, Minnesota (USA).

MONTERO, G; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO_2 por los bosques españoles. Monografias INIA: Serie Forestal, N°13. 270 pag. Madrid

NURMI, J. 2007. Recovery of logging residues for energy from spruce (*Picea abies*) dominated stands. *Biomass Bioenergy* 31: 375–80.

SPINELLI, R. 2007. Chapter 1: "Biomass, LAGs and the transnational project" and Chapter 6: "Conclusions". En GAIO, G.; DA VAL, J.; CARRARA, L. (coord.), 2007. Guidelines for the development of a forest chips supply chain model. San Michelle All'Adige (Italia), CNR/IVALSA. Available at URL: http://www.ivalsa.cnr.it/Files/manualecippatoforestale.pdf (ultimo acceso: 01/2013)

SPINELLI, R.; NATI, C. 2009. A low-investment fully mechanised operation for pure selection thinning of pine plantations. *Croatian J For Eng* 30(2): 89–97

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. 2010. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantations. *Scandinavian J For Res* 25(1): 69-77.

SUADICANI, K. 2003. Production of fuel chips in a 50-years old Norway spruce stand. *Biomass Bioenergy* 25:35-43

TOLOSANA, E. 2009. Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Ed: MundiPrensa – FUCOVASA, 348 pag. Madrid.

TOLOSANA, E.; LAINA, R.; MARTINEZ-FERRARI, R.; AMBROSIO, Y. 2011. Recovering of forest biomass from Spanish hybrid poplar plantations. *Biomass Bioenergy* 35(7):2570–80.

VALBUENA-CARABAÑA, M.; DE HEREDIA, U.L.; FUENTES-UTRILLA, P.; GONZALEZ-DONCEL, I.; GIL, L. 2010. Historical and recent changes in the Spanish forests: A socio-economic process. *Rev Palaeobot Palynol* 162(3):492-506.